NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. JULES VIOLLE,

MAITRE DE CONFÉRENCES A L'ÉCOLE NORMALE.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS ET FILS, IMPRIMEURS-LIBRAIRES

DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE, DU BUREAU DES LONGITUDES,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1889

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16

TABLE DES MATIÈRES.

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. Jules VIOLLE,

MAITRE DE CONFÉRENCES A L'ÉCOLE NORMALE.

SUR L'ÉQUIVALENT MÉCANIQUE DE LA CHALEUR.

Sur l'équivalent mécanique de la chaleur. — Comptes rendus, t. LXX, p. 1283; 1870.

Sur l'équivalent mécanique de la chaleur et sur les propriétés électrothermiques de l'aluminium. — Comptes rendus, t. LXXI, p. 270; 1870.

Sur l'équivalent mécanique de la chaleur. — Thèse et Annales de Chimie et de Physique, 4e série, t. XXI, p. 64; 1870.

Sur les courants d'induction produits dans les masses polaires de l'appareil de Foucault. — Comptes rendus, t. LXXIV, p. 323; 1872.

La chaleur dégagée par un courant électrique peut servir à la mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur, si le courant est lui-même engendré par un travail mécanique, ce qui arrive lorsqu'on force un conducteur à se déplacer en présence d'un aimant. L'échauffement qui se produit dans ces conditions a été mesuré par M. Joule au début de ses mémorables travaux sur la Thermodynamique. Il trouva ainsi un nombre remarquablement exact, mais les résultats divers dont ce nombre est la moyenne variaient presque du simple au double. De nouvelles recherches étaient utiles.

Je les ai entreprises en me servant d'un disque métallique que l'on pouvait faire tourner d'un mouvement parfaitement uniforme entre les pôles d'un fort électro-aimant, suivant la disposition imaginée par Foucault. Sous l'action des courants induits qui s'y développaient, le disque s'échauffait comme par l'effet d'un frein invisible.

Mesure de la chaleur produite. — J'avais modifié l'appareil de façon à enlever rapidement le disque pour le plonger dans un calorimètre où se mesurait l'échauffement produit. Cet échauffement ne représente qu'une partie de la chaleur engendrée dans le disque, qui se refroidit pendant toute l'expérience par le contact avec l'air ambiant. C'est ce qu'indiquent nettement les nombres correspondant à une même vitesse de rotation et à des durées différentes. En prolongeant l'expérience pendant un temps double, par exemple, on n'observe pas un échauffement double ; mais la comparaison des résultats obtenus dans les deux cas permet de déterminer le refroidissement. Comme la température du disque ne dépasse jamais que de quelques degrés la température extérieure, le refroidissement du disque est à chaque instant proportionnel à l'excès thermométrique, le coefficient de proportionnalité étant lui-même proportionnel à la vitesse de rotation. On peut dès lors calculer les échauffements réels, et l'on trouve qu'ils sont exactement proportionnels aux carrés des vitesses.

Vérification de la loi de Joule dans un cas très général. — Mais l'intensité des courants induits, développés à l'intérieur d'un corps conducteur qui se déplace dans un champ magnétique, est proportionnelle à la vitesse de déplacement. La loi de Joule, d'après laquelle l'échauffement d'un conducteur est proportionnel au carré de l'intensité du courant qui le traverse, est donc vraie lors même que le conducteur a une forme quelconque et lors même qu'il est en mouvement.

Mesure du travail dépensé. — En produisant le mouvement par la chute d'un poids, j'avais aisément la mesure du travail, défalcation faite de la charge nécessaire pour entraîner l'axe seul. Ce travail, pendant l'unité de temps, s'est montré lui aussi proportionnel au carré de la vitesse.

Équivalence du travail dépensé et de la chaleur produite. — Dans mon expérience, le travail se transforme en chaleur par l'intermédiaire de

l'électricité. Est-on certain que la transformation s'accomplit tout entière à l'intérieur du disque? Les courants dont celui-ci est le siège ne peuvent-ils pas provoquer par influence des courants d'induction dans les masses polaires de l'électro-aimant?

Pour résoudre cette question, j'ai fait tourner le disque soit dans les conditions ordinaires, soit en présence de masses métalliques additionnelles, placées de manière à exercer une action tout à fait comparable à celle des masses polaires; et j'ai mesuré pour une même vitesse de rotation le travail dépensé et la chaleur dégagée dans chacun des deux cas. Je n'ai constaté aucune différence ni dans la chaleur, ni dans le travail.

Plus tard, Jacobi a prouvé directement l'absence de tout courant dans les masses polaires de l'appareil de Foucault, quand la vitesse du disque est uniforme, fait en complet accord d'ailleurs avec les lois générales de l'induction.

On peut donc être assuré que toute l'énergie employée s'accumule dans le disque pour l'échauffer.

Ainsi la chaleur mesurée est bien l'équivalent mécanique du travail dépensé.

Résultats. — J'ai opéré sur des disques de cuivre, d'étain, de plomb et d'aluminium (ce dernier métal est particulièrement convenable).

Les résultats ont été concordants : le nombre trouvé est presque identique à celui que Regnault publia quelques mois plus tard à la suite de ses belles expériences sur la vitesse de propagation du son; il surpasse de $\frac{1}{40}$ environ celui de Joule.

SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE.

Sur la température du Soleil. — Comptes rendus, t. LXXVIII, p. 1425 et 1816; t. LXXIX, p. 746; 1874.

Une expédition au mont Blanc. — Revue des Deux-Mondes, novembre 1875.

Mesures actinométriques au mont Blanc. — Comptes rendus, t. LXXXII, p. 662, 729 et 896; 1876.

De la température du Soleil. — Journal de Physique, t. V, p. 169; 1876.

Mémoire sur la température moyenne de la surface du Soleil. — Annales de Chimie et de Physique, 5e série, t. X, p. 289; 1877; et, par extrait, Revue des Cours scientifiques, 2e série, t. XIV, p. 944; 1er semestre 1878. — Voir, en outre, le Rapport de M. Desains sur les recherches relatives à la température du Soleil (Comptes rendus, t. LXXXIV, p. 813; 1877).

Voyage scientifique en Algérie. — Club alpin; 1877.

Mesures actinométriques relevées en Algérie pendant l'été de 1877. — Comptes rendus, t. LXXXVI, p. 818; 1878.

Rapport au Congrès météorologique de Rome sur la question XIX (*mesure de la radiation solaire, rôle de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère*). — Utrecht, Kemink et fils; 1879. — Annales de Chimie et de Physique, 5e série, t. XVII, p. 391; 1879. — Paris, Gauthier-Villars; 1879; et, par extrait, Revue des Cours scientifiques, 2e série, t. XVIII, p. 1077; 1er semestre 1880.

Ces différentes publications ont trait à la chaleur solaire et à la température du Soleil.

I. — Chaleur solaire.

Actinomètre absolu. — J'ai d'abord construit un actinomètre permettant de mesurer exactement la quantité de chaleur que reçoit en un lieu donné une surface de 1cq normale aux rayons solaires.

Ces rayons viennent frapper la boule d'un thermomètre, placée au centre d'une enceinte sphérique à température constante. On suit la marche ascendante du thermomètre jusqu'à ce que la température soit devenue stationnaire; on intercepte les rayons, et l'on observe le refroidissement. La somme des vitesses d'échauffement et de refroidissement pour une même température de la boule représente l'action du Soleil, qui se trouve ainsi déterminée par l'ensemble des observations.

Étude du rayonnement en un lieu donné. — Par cette méthode, j'ai fait, à Grenoble et aux environs, un grand nombre de mesures qui m'ont prouvé que la quantité de chaleur arrivant à la surface du sol dépend essentiellement de la masse de vapeur d'eau que les rayons solaires ont eu à traverser. Si la composition de l'atmosphère restait constante, l'intensité de la radiation s'élèverait graduellement du lever du soleil à midi pour redescendre par la même gradation jusqu'au coucher du soleil.

Une symétrie exacte de la courbe horaire ne se rencontre pour ainsi dire

jamais dans nos climats : le maximum arrive ordinairement avant midi et la descente est moins rapide que la montée. Ce maximum peut d'ailleurs varier beaucoup d'un jour à l'autre. La marche de la radiation en un lieu quelconque est liée intimement au climat du lieu dont elle est peut-être la véritable caractéristique.

Actinomètre à boules conjuguées. — Pour suivre la marche de la radiation en un lieu donné, il suffit évidemment de faire des mesures relatives. J'ai construit, à cet effet, un actinomètre à boules métalliques, conservant toute la simplicité des thermomètres conjugués, mais évitant l'emploi d'une enveloppe de verre qui a l'inconvénient d'éteindre une portion notable des rayons.

MM. Richard ont appliqué leur ingénieux système enregistreur à mon appareil, dont l'usage se prête ainsi très facilement aux observations météorologiques.

Mesure de la constante solaire. — S'il y a grand intérêt à mesurer à chaque instant la fraction de chaleur solaire qui arrive à la surface du sol, il serait avant tout utile de savoir la vraie quantité de chaleur qui tombe sur 1^{cq} de surface à la limite de notre atmosphère. Cette constante solaire est l'élément important à connaître, non seulement pour la physique céleste, mais pour la physique de notre globe : car, si l'atmosphère la plus sereine arrête encore près de la moitié (voir p. 11) de la chaleur que le Soleil envoie vers la terre, cette partie interceptée est réellement mise en réserve et nous sera rendue plus tard presque en entier soit comme chaleur, soit comme force.

Méthode des observations simultanées. — Pour obtenir la constante solaire, il faut éliminer l'absorption produite par notre atmosphère. Mais, quand il s'agit d'une influence perturbatrice, au lieu de la mesurer telle qu'elle se présente, on doit toujours commencer par l'atténuer autant que possible. Le vrai moyen d'arriver à une évaluation exacte de la chaleur solaire sera donc de s'élever au-dessus du sol aussi haut que l'on pourra, de façon à saisir les rayons à peine atteints encore par l'absorption, qui a lieu surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère. Si, d'autre part, on a soin d'effectuer en même temps une mesure actinométrique en bas, on pourra

évaluer avec certitude l'absorption de la longue colonne d'air comprise entre les deux stations dans des conditions physiques exactement connues (par les observations météorologiques auxquelles on aura soin de la soumettre). On sera dès lors en état d'estimer avec toute probabilité la faible absorption causée par la partie de l'atmosphère qui reste au-dessus de la station la plus élevée. On pourra donc connaître et l'intensité vraie du rayonnement solaire et l'absorption totale exercée par l'atmosphère terrestre.

Expédition au mont Blanc. — Tel est le principe des recherches en vue desquelles, après de nombreuses ascensions dans les Alpes du Dauphiné, j'ai gravi le mont Blanc (4810^m) le 16 août 1875, tandis que M. Margottet s'installait au bas du glacier des Bossons (1200^m), pour y faire les observations comparatives dont il avait bien voulu se charger. Nos expériences furent favorisées par un temps exceptionnel, d'une sérénité parfaite, d'un calme absolu au sommet de la montagne comme dans la plaine. Aussi l'échauffement (qui atteignit 18° au sommet et 13°,8 aux Bossons) et le refroidissement s'effectuèrent-ils de la façon la plus régulière et tous les deux avec la même vitesse. Les observations se résument par des exponentielles qui permettent de calculer immédiatement la somme des vitesses relatives à une même température. On trouva ainsi pour la quantité de chaleur reçue en une minute par 1^{cq} de surface normale aux rayons solaires, le 16 août 1875 à $10^h 22^m$ du matin [1] : à la cime du mont Blanc $2^u,392$, et au glacier des Bossons $2^u,022$, l'unité de chaleur étant, comme d'habitude, rapportée au gramme et au degré centigrade.

Formule d'absorption. — Ces mesures, comme toutes celles que j'avais déjà faites dans les montagnes du Dauphiné, montrent que l'absorption par une longue colonne d'air, de plusieurs kilomètres de hauteur, est bien représentée par une formule établie sur l'hypothèse d'une atmosphère composée essentiellement d'air et de vapeur d'eau, cette dernière énormément plus absorbante que l'air.

---

(1) La température T, la pression barométrique H et la tension de la vapeur d'eau f étaient respectivement :

	T.	H.	f.
A la cime du mont Blanc	1°	430^{mm}	$0^{mm},9$
Au glacier des Bossons	9°,5	661^{mm}	$5^{mm},3$

Valeur de la constante solaire. — En étendant cette formule à la masse d'air située au-dessus du mont Blanc, masse où la vapeur d'eau fait presque complètement défaut et dont l'absorption est par conséquent très faible (c'est là le grand avantage de la méthode), j'ai trouvé pour la constante solaire $2^{\text{u}}, 54$.

Ce nombre était très supérieur à tous ceux que l'on avait obtenus jusqu'alors.

Intensité du rayonnement à différents niveaux. — Tandis que la cime du mont Blanc recevait 0,94 de la chaleur incidente, il n'en arrivait plus que 0,88 aux Bossons et 0,68 au niveau de Paris, où l'absorption par la vapeur était 5 fois l'absorption par l'air.

Coefficient d'absorption de la vapeur d'eau. — De toutes ces observations, j'ai pu déduire avec exactitude le coefficient d'absorption de la vapeur d'eau pour la chaleur solaire, coefficient si difficile à mesurer dans un laboratoire sur une colonne gazeuse de quelques mètres seulement de longueur. Le coefficient d'absorption de la vapeur d'eau égale 1900 fois le coefficient d'absorption de l'air.

Mesure de la quantité totale de vapeur d'eau contenue dans l'air à un instant donné. — Ma formule permet également de calculer avec une très grande approximation la quantité totale de vapeur d'eau contenue dans l'air à partir du point où l'on se trouve jusqu'aux limites de l'atmosphère. Il suffit pour cela de comparer l'intensité actuelle à l'intensité disponible, c'est-à-dire à l'intensité du rayonnement que laisserait arriver à l'observateur un air parfaitement sec et pur de poussières (l'effet de celles-ci échappant au calcul, la formule n'est applicable que par un temps limpide). On peut ainsi évaluer un élément météorologique important qu'une simple observation à la surface du sol ne semblait pas permettre de mesurer.

Méthode des observations successives. — Bien que le procédé des observations simultanées au sommet et à la base d'une même montagne me parût incontestablement le plus sûr, la nécessité de varier les méthodes, qui est la loi fondamentale de toute expérimentation, me commandait de reprendre mes mesures aux diverses heures d'un même jour, suivant l'exemple de Pouillet. De cette manière, en effet, on opère successivement

sur des épaisseurs d'air différentes, traversées par les rayons solaires; et le rôle de l'atmosphère peut encore être exactement évalué, si les conditions météorologiques sont restées invariables pendant toute la durée des observations.

Expédition en Algérie. — Cette invariabilité ne se rencontrant guère dans nos climats, j'allai la chercher dans le Sahara; et, après divers essais plus ou moins satisfaisants à Biskra et à Khanga, je trouvai à Laghouat « l'immobilité radieuse, la fixité du beau temps » qui avaient si fortement frappé Fromentin lors de son *été dans le Sahara.* Des observations météorologiques que je fis à Laghouat il ressort, en effet, que la quantité de vapeur d'eau existant dans l'air au niveau du sol reste la même aux diverses heures de la journée. Ce phénomène, qui s'est maintenu tout le temps que j'ai passé à Laghouat, dans la courtoise hospitalité du tant regretté commandant Flatters, explique la régularité persistante de la radiation « d'un soleil toujours calme, dévorant et sans rayons ». Les mesures actinométriques relevées les 12 et 13 juillet 1877 peuvent être convenablement représentées par la formule de Bouguer et donnent pour la constante solaire un nombre très voisin du nombre obtenu au mont Blanc, bien que légèrement inférieur.

Supériorité de la première méthode. — Ainsi, lors même qu'elles sont effectuées dans des circonstances exceptionnellement propices, où la méthode des mesures successives semble absolument inattaquable, les observations au niveau du sol donnent encore pour la constante solaire un nombre un peu plus faible que les observations à de grandes hauteurs. En opérant au sommet du mont Blanc, à une altitude où les poussières n'existent guère, où la masse d'air est réduite presque à moitié, où la tension de la vapeur d'eau est excessivement faible, je pouvais recueillir des radiations qui échappent en plaine dans les conditions les plus favorables.

Cet avantage est aujourd'hui hors de conteste.

II. — Température du Soleil.

La température du Soleil se déduirait immédiatement du nombre exprimant la constante solaire, si l'on connaissait la loi suivant laquelle varie,

avce la température, l'énergie totale du rayonnement émis par une masse gazeuse incandescente.

Température effective du Soleil. — Mais on ne connaît pas cette loi. D'après Dulong et Petit, le rayonnement absolu d'un corps est représenté par le produit de deux facteurs, dont l'un, le pouvoir émissif, dépend de la nature de la surface rayonnante, tandis que l'autre est dans tous les cas une même fonction de la température. Si nous admettons que cette formule convient au Soleil, si nous supposons en outre que la surface solaire a (comme le noir de fumée) un pouvoir émissif égal à l'unité, nous sommes conduits à cette conséquence que, pour émettre une quantité de chaleur égale à celle qu'il nous envoie effectivement, le Soleil devrait seulement avoir une température de 1500°. Toutefois la loi de Dulong et Petit n'est, à proprement parler, qu'une formule empirique résumant leurs expériences entre 0° et 300°. Est-elle encore applicable à 1500°? Pour le reconnaître, j'ai dirigé mon actinomètre sur la coulée d'acier sortant d'un four Martin-Siemens aux forges d'Allevard, et, raisonnant comme précédemment, j'ai déduit de la mesure obtenue la température effective de la source, 1050°. Cette température s'est montrée peu différente du nombre calculé directement d'après la température vraie et le pouvoir émissif réel de l'acier en fusion. Ainsi, la loi de Dulong et Petit ne s'écarte pas beaucoup de la vérité à plus de 1000°; elle pouvait donc être employée, comme première approximation, au calcul de la température effective du Soleil.

Température moyenne vraie de la surface solaire. — En attribuant au Soleil le pouvoir émissif de l'acier en fusion, on trouve pour sa température 2000°. Mais le pouvoir émissif de la surface solaire est assurément beaucoup moindre; en outre, à ces hautes températures, la loi de Dulong et Petit donne des nombres trop faibles, comme nous le verrons plus loin (p. 18). La température moyenne vraie de la surface solaire est donc plus élevée; mais elle ne dépasse pas *quelques milliers de degrés.* D'une part, en effet, une diminution considérable du pouvoir émissif (une réduction à moitié, par exemple) n'entraîne au-dessus de 2000° qu'un accroissement d'un petit nombre de degrés; d'autre part, l'erreur de la loi de Dulong et Petit ne se chiffre elle-même que par quelques centaines de degrés. Il est bien entendu d'ailleurs que je considère uniquement la tem-

pérature moyenne, qui peut très bien être dépassée en certains points du Soleil. C'est cette température moyenne que je dis être du même ordre de grandeur que les températures auxquelles nous savons atteindre dans nos laboratoires.

Deux faits, sur lesquels j'ai dû particulièrement insister à l'époque où je les ai constatés, confirment cette proposition :

1° Les sources terrestres ont sur l'actinomètre un effet qui est une fraction parfaitement appréciable ($\frac{1}{4}$ pour la coulée d'acier d'Allevard) de l'effet produit par le Soleil.

2° L'excès thermométrique dans un actinomètre exposé au soleil diminue sensiblement quand la température de l'enceinte augmente seulement de quelques centaines de degrés : ce qui prouve, contrairement à l'opinion de Waterston, que 100° ou 200° ne sont pas négligeables par rapport à la température du Soleil.

Ce travail a été récompensé par l'Académie (prix Bordin pour 1876).

SUR CERTAINES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

Chaleur spécifique et chaleur de fusion du platine. — Comptes rendus, t. LXXXV, p. 543; 1877. — Journal de Physique, t. VII, p. 69; 1878.

Chaleur spécifique et chaleur de fusion du palladium. — Comptes rendus, t. LXXXVII, p. 981; 1878.

Chaleurs spécifiques et points de fusion de divers métaux réfractaires. — Comptes rendus, t. LXXXIX, p. 702; 1879. — Journal de Physique, t. IX, p. 81; 1880.

Température d'ébullition du zinc. — Comptes rendus, t. XCIV, p. 720; 1882.

Sur un calorimètre par refroidissement. — Comptes rendus, t. XCIV, p. 1510; 1882.

Toutes les sources calorifiques naturelles étant comprises dans des limites de quelques milliers de degrés, il importait de fixer avec exactitude quelques-unes des températures terrestres les plus élevées, d'autant plus que les renseignements à cet égard étaient singulièrement imparfaits. C'est dans ce dessein que j'ai entrepris les expériences dont je dois parler maintenant.

Chaleurs spécifiques des métaux réfractaires, mesurées à différentes températures. — J'ai opéré sur différents métaux réfractaires et j'en ai d'a-

bord déterminé les chaleurs spécifiques jusqu'à la température la plus haute que l'on puisse mesurer à l'aide d'un thermomètre à gaz, avec réservoir en porcelaine, soit environ 1200°. Je laisse de côté les difficultés inhérentes à de telles expériences, pour mentionner immédiatement le résultat relatif au palladium, au platine et à l'iridium.

Dans ces trois métaux, de la même famille, la chaleur spécifique varie linéairement de zéro à 1200°.

Au cours des remarquables recherches qu'il poursuit actuellement sur les basses températures, M. Cailletet a vérifié cette relation jusqu'à — 100°.

Points de fusion des métaux réfractaires. — Si nous admettons que la même relation persiste jusqu'à la fusion, il suffira de mesurer la quantité de chaleur que le métal absorbe de zéro à la température de fusion pour en déduire cette température même. En conséquence, je faisais fondre une certaine quantité de platine, et, au moment où la surface du bain allait se solidifier, j'y plongeais un fil de platine contourné en spirale, à l'aide duquel j'enlevais une rosette de métal que j'immergeais dans l'eau d'un calorimètre. Je pouvais ainsi mesurer la quantité de chaleur cédée par 1^{gr} de platine solide, du point de fusion à zéro. Exprimant, d'autre part, cette quantité de chaleur par la formule linéaire obtenue précédemment, j'en déduisis le point de fusion du platine. J'opérai d'une façon toute semblable avec l'iridium (les difficultés expérimentales sont alors très grandes) et de même avec le palladium; et j'obtins les nombres suivants, qui représentent, en degrés centigrades du thermomètre à gaz, les points de fusion de ces métaux : iridium, 1950°; platine, 1775°; palladium, 1500°.

Cette dernière température étant relativement facile à manier, j'ai pu soumettre à un contrôle précieux l'extrapolation sur laquelle reposent ces nombres. J'ai chauffé ensemble un lingot de platine et un lingot de palladium, et j'ai vérifié que la mesure calorimétrique de la température du foyer par l'un et l'autre des deux métaux donnait exactement le même résultat, si près que l'on fût du point de fusion du palladium. La variation de la chaleur spécifique de ces métaux avec la température reste donc constante jusqu'au point de fusion.

Pyromètre à lingot de platine. — La connaissance de la chaleur spécifique du platine permet de déterminer exactement, par la méthode ca-

lorimétrique, toute température jusqu'à 1775°. Il suffit, en effet, de projeter dans l'eau un lingot de platine porté à la température inconnue et de procéder sur le mélange à une opération calorimétrique ordinaire pour en conclure immédiatement le nombre de degrés cherché.

Résultats relatifs au cuivre, à l'or, à l'argent, etc. — J'ai déterminé en outre la chaleur spécifique de l'or à différentes températures, ainsi que les points de fusion du cuivre (1054°), de l'or (1045°) et de l'argent (950°).

Un de mes élèves, M. Pionchon, poursuivant ces recherches, a vérifié sur le platine iridié l'exactitude de mes mesures relatives au platine et à l'iridium, auxquels j'avais trouvé la même chaleur spécifique à toute température.

Point d'ébullition du zinc. — En effectuant les expériences précédentes, j'eus l'occasion de vérifier le fait, déjà observé par M. E. Becquerel, que l'argent ne fond pas dans un vase chauffé par de la vapeur de zinc bouillant, ce qui était en contradiction avec le nombre admis par plusieurs savants pour la température d'ébullition du zinc. Voulant déterminer directement cette température, j'ai fait construire, en fonte émaillée, un vase à triple enceinte, tout semblable à celui qui sert à déterminer le point 100° du thermomètre à mercure, et j'ai pris au thermomètre à gaz le point d'ébullition normale du zinc, que j'ai trouvé égal à 930°.

Calorimètre par refroidissement. — Au même ordre de travaux se rattache la disposition d'un petit appareil propre à mesurer, par la méthode du refroidissement, les chaleurs spécifiques entre 100° et 500°, c'est-à-dire dans l'intervalle où la méthode des mélanges présente des difficultés spéciales, le corps chaud ne pouvant pas alors être mis en contact immédiat avec le liquide calorimétrique. Cet appareil consiste simplement en un flacon de verre mince, à col étroit et à deux enveloppes, entre lesquelles on a fait le vide, de sorte que le refroidissement s'opérera toujours dans des conditions identiques.

SUR LA LOI DU RAYONNEMENT.

Sur la radiation du platine incandescent. — Comptes rendus, t. LXXXVIII, p. 171; 1879.

Intensités lumineuses des radiations émises par le platine incandescent. — Comptes rendus, t. XCII, p. 866; 1881.

Sur la loi du rayonnement. — Comptes rendus, t. XCII, p. 1204; 1881.

Comparaison des énergies rayonnées par le platine et l'argent fondants. — Comptes rendus, t. CV, p. 163; 1887.

Une fois en possession de certaines températures élevées, fixes et déterminées, j'ai pu aborder la recherche de la loi suivant laquelle une radiation donnée varie avec la température.

Intensités lumineuses des radiations émises par le platine à différentes températures. — A cet effet, j'ai mesuré les intensités lumineuses de diverses radiations simples, émises par le platine à différentes températures.

Pour avoir, par exemple, du platine à 1045°, on mettait un culot de platine dans un creuset en biscuit de porcelaine, contenu lui-même dans un creuset en terre réfractaire plein d'or. Le tout était placé dans un très gros four Perrot vertical, que traversait suivant l'axe un long tube en terre réfractaire par lequel on pouvait voir la surface du platine. On chauffait jusqu'à fondre l'or; on fermait un peu le robinet d'arrivée du gaz, de manière à provoquer un commencement de solidification; on rouvrait légèrement et, après quelques tâtonnements, on arrivait à se tenir juste au point de fusion, la grande masse du four assurant un champ calorifique invariable. En changeant la nature du bain métallique, et en recourant au besoin au chalumeau Schlœsing et à des enveloppes en plombagine, j'ai pu opérer à toutes les températures que j'avais précédemment mesurées jusqu'à 1775°.

Je comparais entre elles, à l'aide d'un spectrophotomètre, les radiations de même réfrangibilité émises par le platine et par une lampe Carcel type. J'appliquais, suivant le cas, l'une ou l'autre des deux méthodes par lesquelles se mesurent habituellement les intensités lumineuses : égalisation des éclairements de deux plages contiguës; annulation des lignes isochromatiques provoquées par un polariseur sensible.

J'ai trouvé que l'intensité d'une radiation simple augmente très rapidement avec la température, moins vite cependant que ne le voudrait la loi de Dulong et Petit, laquelle devient de plus en plus inexacte à mesure que la température s'élève. L'intensité d'une radiation donnée ne paraît pas croître au delà de toute limite.

Formule. — J'ai établi une formule qui représente très exactement la marche du phénomène jusqu'à la fusion du platine, et qui, tenant compte de la longueur d'onde, montre le rôle important des radiations les plus réfrangibles aux températures élevées.

Ce rôle est confirmé par l'expérience suivante :

Rapport de l'énergie de la partie lumineuse d'un rayonnement à l'énergie totale. — Si l'on fait arriver sur une pile thermo-électrique le rayonnement total émanant d'une source déterminée, puis ce même rayonnement transmis à travers une plaque d'alun qui arrête, comme l'on sait, toutes les radiations obscures, on peut mesurer le rapport de l'énergie de la partie lumineuse à l'énergie totale du rayonnement. Desains a trouvé que ce rapport, égal à $\frac{1}{3}$ environ pour le Soleil, était insensible pour le platine « incandescent » (dont la température n'est pas autrement indiquée). En opérant sur du platine en fusion, j'ai obtenu une valeur supérieure à $\frac{1}{5}$. On en doit conclure qu'à 1775° les radiations les plus réfrangibles ont pris dans le spectre du platine une valeur relative qu'elles étaient loin d'avoir quelques centaines de degrés plus bas.

Conséquence relative à la température du Soleil. — Nous voyons aussi que la température de fusion du platine n'est pas extrêmement éloignée de la température moyenne de la surface du Soleil, comme nous nous sommes efforcé de le démontrer précédemment.

Rapport des énergies totales rayonnées par le platine et par l'argent fondants. — J'ai cherché encore à déterminer le rapport des énergies totales rayonnées par le platine et par l'argent fondants.

Je recevais le rayonnement total de l'un des métaux sur la surface enfumée d'une pile thermo-électrique et je l'équilibrais au moyen d'une source compensatrice placée derrière un œil-de-chat, en me servant d'un galvanomètre Thomson très sensible.

Des nombres successivement obtenus avec les deux métaux, j'ai tiré

le rapport, jusqu'alors complètement inconnu, des énergies totales rayonnées par le platine et par l'argent fondants, soit 54.

D'autre part, j'ai trouvé que le rapport des intensités lumineuses est supérieur à 1000.

Le rapport de l'énergie lumineuse à l'énergie totale, qui dépasse $\frac{1}{5}$ pour le platine fondant, est donc à peine $\frac{1}{100}$ pour l'argent.

Ainsi, aux très hautes températures, l'énergie totale augmente surtout par l'accroissement rapide des radiations les plus réfrangibles.

Pyromètre photométrique. — Les mesures d'intensité lumineuse conduisent à une application importante, l'évaluation, en degrés du thermomètre à air, de toute température inférieure à 1775°. Il suffira de comparer, à travers un verre rouge (ou mieux à l'aide d'un spectrophotomètre), l'intensité de la carcel type (ou de tout autre étalon) à celle d'un culot de platine placé dans le foyer dont la température doit être déterminée. Cela fait, les Tables qui résument mes observations donneront immédiatement le nombre de degrés cherché. On remarquera que l'exactitude du procédé est d'autant plus grande que la température est plus haute.

SUR L'UNITÉ ABSOLUE DE LUMIÈRE.

Sur l'étalon lumineux. — Comptes rendus des travaux du Congrès international des électriciens à Paris en 1881, p. 352.

Détermination d'un étalon de lumière. — Procès-verbaux de la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques, réunie à Paris en octobre 1882, p. 125.

Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification. — Comptes rendus, t. XCVI, p. 253; 1883. — Journal de Physique, 2e série, t. II, p. 366; 1883.

Note sur les expériences effectuées pour la détermination de l'étalon absolu de lumière. — Paris, Gauthier-Villars; 1884. — Annales de Chimie et de Physique, 6e série, t. III, p. 373; 1884, et, par extrait, Journal de Physique, 2e série, t. III, p. 241; 1884.

Étalon de lumière. — Procès-verbaux de la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques; 2e session, tenue à Paris en mai 1884, p. 103.

Nouvel étalon de lumière fourni par le platine fondant. — Au cours des expériences que je viens de rappeler, j'avais été frappé par la beauté et la fixité de la lumière qu'émet un bain de platine liquide. Aussi, lorsque la

question d'un nouvel étalon de lumière fut soumise au Congrès international des électriciens, réuni à Paris en 1881, je proposai de prendre pour étalon un centimètre carré de platine à son point de fusion, c'est-à-dire une portion déterminée de la surface d'un corps toujours identique à lui-même et émettant sans flamme une lumière éclatante dont l'invariabilité est assurée par l'un des principes fondamentaux de la Physique. Cette proposition fut accueillie favorablement; et, l'année suivante, la Conférence internationale pour la détermination des unités électriques, « reconnaissant que les recherches déjà faites donnaient lieu d'espérer que la lumière émise par le platine fondant pouvait conduire à un étalon absolu », exprima le vœu que ces expériences fussent poursuivies. Je me fis un devoir de répondre à ce désir.

Constance du rayonnement pendant la solidification de l'argent ou du platine. — Pour confirmer le principe de la méthode qui consiste à prendre comme étalon de lumière un métal à son point de fusion, j'ai expérimenté d'abord sur l'argent, qui était tout indiqué pour une étude de ce genre, bien que sa radiation lumineuse soit très faible. Un bain d'argent fondu fut glissé sous une pile thermo-électrique reliée à un galvanomètre à miroir. Le rayonnement du bain venait frapper normalement la pile par une ouverture ménagée dans un écran à double paroi et recouverte d'une lame de quartz. Le métal liquide se refroidissant, on observe que l'intensité décroît d'abord rapidement, puis plus lentement, pour s'accroître un peu au moment même où la solidification commence sur les bords. Le liquide forme alors au milieu de la partie solidifiée une sorte de lac dont les rives avancent progressivement: pendant toute cette phase du phénomène, le rayonnement de la surface liquide demeure constant. Quand la solidification gagne le centre, une légère augmentation d'intensité se manifeste, suivie bientôt d'un décroissement rapide, qui correspond au refroidissement du métal entièrement solidifié. La courbe de refroidissement présente donc une portion horizontale, précédée d'une légère montée et suivie d'un petit ressaut. La montée initiale provient de la surfusion qu'il est difficile d'éviter complètement; le ressaut final accuse un accroissement brusque du pouvoir émissif lors de la solidification : l'intervalle pendant lequel le rayonnement reste constant est ainsi nettement limité.

Le platine se comporte d'une manière toute semblable. Quand on suit au photomètre la solidification de ce métal, on constate que l'intensité lumineuse diminue d'abord rapidement, puis de moins en moins vite, devient ensuite stationnaire, pour reprendre enfin quelques instants plus tard, et après un *éclair*, une marche de nouveau décroissante. Dans une mesure photométrique, l'opérateur aura donc parfaitement conscience de la phase d'intensité constante.

Expériences sur le nouvel étalon. — Parmi les expériences auxquelles j'ai soumis le nouvel étalon, je laisserai de côté celles qui ont établi d'une façon rigoureuse la valeur de la carcel type en fonction de l'unité absolue, soit 0,481. Je rappellerai seulement les nombreuses mesures relatives aux lampes à incandescence, parce que, effectuées par trois observateurs différents et pour des régimes assez variés des lampes, elles ont fourni une démonstration péremptoire de la fixité absolue de mon étalon.

Par sa constance, non moins que par sa blancheur et son éclat intrinsèque, qui est à très peu près onze fois celui de la carcel, le platine à son point de fusion remplit donc toutes les conditions que l'on est en droit d'exiger de l'étalon prototype, de celui qui doit rester comme un terme de comparaison invariable pour les étalons secondaires.

Unité de lumière. — Tel fut effectivement l'avis de la Conférence qui, en 1884, consacra mes travaux par l'adoption des deux propositions suivantes :

« L'unité de chaque lumière simple est la quantité de lumière de même espèce émise en direction normale par un centimètre carré de platine fondu, à la température de solidification. »

« L'unité pratique de lumière blanche est la quantité totale de lumière émise normalement par la même source. »

Dispositions pratiques. — Depuis cette époque, M. Werner Siemens a construit une petite lampe au dixième, qui, par la fusion électrique d'un ruban de platine derrière une ouverture de $0^{cq},1$, donne très simplement le dixième de l'unité absolue. De mon côté, j'ai cherché à faciliter la manœuvre de la fusion oxyhydrique et, avec l'aide de M. Carpentier, j'ai réussi à obtenir un appareil tout à fait pratique.

SUR L'ÉMISSION.

Sur la loi du cosinus. — Annales de Chimie et de Physique, 6e série, t. III, p. 373; 1884.

Polarisation par émission. — Comptes rendus, t. CV, p. 111; 1887. — Journal de Physique, 2e série, t. VII, p. 195; 1888.

L'argent liquide à la température de solidification offrant, dans des conditions faciles à réaliser, une surface incandescente d'une netteté parfaite et à un état rigoureusement déterminé, je l'ai employé à étudier diverses questions relatives au phénomène de l'émission.

Loi du cosinus. — J'ai reconnu que le rayonnement émis sous différentes incidences par l'argent liquide suit exactement la loi du cosinus jusque vers 60°. Au delà, l'intensité de la radiation émergente est un peu supérieure à celle qui résulterait de la loi de Lambert.

Ce fait a été établi par deux systèmes de mesures distinctes : mesures d'intensité calorifique au moyen de la pile thermo-électrique, mesures d'intensité lumineuse à l'aide d'un photomètre spécial fondé sur l'acuité visuelle. Si un photomètre de ce genre n'est pas d'une grande sensibilité, il permet du moins de constater directement l'égalité de deux éclairements successifs : l'exactitude de la démonstration dépendra du nombre des épreuves.

Polarisation par émission. — La polarisation par émission n'a été jusqu'à présent que fort peu étudiée, sans doute à cause de la difficulté d'avoir des surfaces dans un état physique bien défini.

J'ai mesuré avec le photopolarimètre de M. Cornu la proportion de lumière polarisée contenue dans le faisceau émis par l'argent liquide sous différentes inclinaisons. Elle est à très peu près égale au sinus verse de l'angle d'émission. La polarisation se manifeste donc nettement sous toutes les incidences, fait qui intéresse non seulement la Physique, mais encore l'Astronomie, puisqu'il corrobore les idées d'Arago sur la constitution gazeuse de la photosphère solaire.

SUR LA DIFFUSION DU CARBONE.

Comptes rendus, t. XCIV, p. 28; 1882.

J'avais disposé pour fondre le palladium (voir p. 15) un vase double, consistant en un creuset de porcelaine placé à l'intérieur d'un creuset de plombagine.

Ce vase présente après la chauffe une apparence singulière : au dehors, la plombagine a brûlé et la matière qui s'y trouvait mêlée est seule restée, de sorte que le creuset de plombagine semble être en terre; le creuset de porcelaine au contraire s'est imprégné de charbon et offre extérieurement l'aspect de la plombagine. Le carbone a pénétré dans la porcelaine par une véritable diffusion, la pénétration étant d'autant plus profonde que l'expérience a été plus prolongée.

Ce fait, que je crois avoir observé le premier (ces observations datent de 1878), a été constaté depuis pour d'autres substances.

SUR L'ALLIAGE DU KILOGRAMME.

Comptes rendus, t. CVIII, p. 892; 1889.

La matière adoptée pour les prototypes nationaux du kilogramme est, comme on sait, le platine à 10 pour 100 d'iridium. Cet alliage a été préparé avec le plus grand soin par M. Matthey, qui a réussi à dépasser notablement le degré de perfection chimique requis par la Commission internationale : les analyses de MM. Stas et Debray donnent toute certitude à cet égard. Cependant, lorsque je pris la densité des cylindres de platine iridié destinés à faire les prototypes, je trouvai dans bien des cas un nombre trop faible. Il existait donc des vides à l'intérieur des cylindres. Sur plusieurs d'entre eux, en effet, nous reconnûmes, M. Debray et moi, des fentes parallèles à l'axe, provenant du laminage de lingots qui contenaient quelques parcelles du creuset dans lequel le métal avait été fondu. Il fallait remédier à cette défectuosité. Guidés par les mesures de densité, nous réussîmes à obtenir un procédé certain pour rendre excellents les kilogrammes qui n'avaient pas la densité exigée par la Commission : les fondre et les frapper ensuite au balancier jusqu'à refus dans une matrice *ad hoc*. Tous les cylindres traités de cette façon ont offert exactement la même densité,

égale à celle d'un mélange de 9 parties de platine et de 1 partie d'iridium, les variantes introduites à dessein dans la frappe, le recuit, l'écrouissage, n'ayant eu aucun effet sur le résultat. En résumé :

1° L'alliage de 9 parties de platine et de 1 partie d'iridium se comporte au point de vue de la densité (et aussi au point de vue de la chaleur spécifique, voir p. 16) comme un mélange.

2° Pour cet alliage et sans doute aussi pour tout métal physiquement homogène, la densité est un nombre parfaitement défini qui, une fois atteint, ne peut plus être modifié, ni par l'écrouissage, ni par le recuit, ni par les frappes les plus énergiques.

SUR L'ÉLECTROLYSE.

Sur l'électrolyse de l'eau (en commun avec M. Chassagny). — Comptes rendus, t. CVIII, p. 284; 1889.

La décomposition de l'eau par un courant énergique est accompagnée de phénomènes lumineux et calorifiques signalés, il y a plus de quarante ans, par MM. Fizeau et Foucault. En reprenant ces expériences avec une machine Gramme, nous avons pu constater quelques faits nouveaux.

Une augmentation graduelle du courant nous a permis d'observer sur l'électrode négative successivement :

1° Le dégagement ordinaire d'hydrogène, en bulles serrées;

2° Une gaine lumineuse séparant le fil négatif du liquide et dans laquelle se dégage exclusivement l'hydrogène;

3° Un déchirement de la gaine en bulles crépitantes.

Gaine lumineuse. — Le courant étant suffisant pour former la gaine, si l'on enfonce lentement le fil négatif, elle s'étale en pénétrant dans le liquide avec le fil, jusqu'à une certaine profondeur proportionnelle à l'énergie disponible. Plus bas, la gaine disparaît et le dégagement ordinaire par bulles recommence. Le passage de la gaine aux bulles est accompagné d'une sorte d'explosion. De même, si l'on supprime le courant, la gaine ne disparaît pas immédiatement et un bruissement se produit quand le liquide arrive au contact du métal chaud. Il n'est pas douteux que la caléfaction contribue puissamment à l'entretien du phénomène.

Bulles crépitantes. — La gaine étant établie sur une certaine longueur,

si l'on fait croître progressivement la différence de potentiel entre les deux électrodes, le liquide s'élève autour de l'électrode négative, la gaine s'élargit et se déchire en grosses bulles avec une vive lumière et un bruit strident; la partie immergée de l'électrode rougit et peut même fondre. A cette forme bruyante de l'électrolyse correspond une désagrégation superficielle de l'électrode négative : bientôt le liquide se charge d'une poudre noire, très lourde, que l'analyse par le vide au-dessus de 400° nous a montrée être un hydrure de platine correspondant à la formule Pt^2H.

SUR LA PROPAGATION DU SON.

(EN COMMUN AVEC M. VAUTIER.)

Sur la propagation du son dans un tuyau cylindrique. — Comptes rendus, t. CII, p. 103; 1886.

Sur la vitesse de propagation du son. — Comptes rendus, t. CVI, p. 1003; 1888.

Malgré les travaux fameux dont elle a été l'objet, la vitesse de propagation du son dans l'air n'est pas connue avec la précision que réclame l'importance du sujet. Les déterminations les plus exactes (réduites à la température de zéro) oscillent entre $332^m,3$ (Moll et van Beck) et $330^m,6$ (Regnault). La grandeur de l'écart montre combien sont considérables les difficultés du problème.

Quelle influence la longueur, l'amplitude, la forme de l'onde ont-elles sur la propagation dans l'air ?

Quel est réciproquement l'effet de la propagation sur l'onde elle-même?

Nous avons essayé d'élucider quelques-uns de ces points en étudiant la propagation du son dans une longue conduite souterraine que la ville de Grenoble venait de faire construire pour l'adduction des eaux. Cette conduite se composait de deux tuyaux parallèles, de $0^m,70$ de diamètre, que nous réunîmes de façon à former un tube en U ayant plus de 12^{km} de longueur.

Sur les deux têtes de ce tube furent placés les appareils d'exploration, dont la partie essentielle était toujours une membrane : membrane du tympan, membrane de caoutchouc à contact électrique ou à levier; le tambour à levier de M. Marey nous a particulièrement servi à suivre les

modifications de l'onde. Sous quelque forme d'ailleurs que nous ayons employé la membrane, nous avons eu soin de réduire autant que possible et de mesurer l'erreur inhérente à la méthode : le retard dû à l'inertie de la membrane a toujours été inférieur à un centième de seconde, et par suite la différence des retards au départ et à l'arrivée atteignait à peine quelques millièmes de seconde, la durée du parcours dépassant trente-sept secondes.

L'onde fut produite soit au moyen d'un pistolet, soit avec des instruments de musique.

J'indiquerai en peu de mots les résultats de nos expériences :

1° L'ébranlement sonore se fond graduellement en une onde simple sans action acoustique. En effet, au delà d'une vingtaine de kilomètres, le son du pistolet cesse d'être perçu : l'oreille, bien que recevant une poussée énergique, n'entend plus absolument rien. De même, le tambour à levier, qui inscrivait au départ une courbe à dentelures régulières, ne donne plus que le tracé continu d'une grande onde qui va s'aplatissant de plus en plus, et tend vers une forme symétrique.

2° La vitesse du front de l'onde diminue avec l'intensité. La chose, restée douteuse après les expériences de Regnault, résulte nettement des nombres que nous avons obtenus en mesurant les temps employés par le front de l'onde à parcourir une première, une deuxième, une troisième, une quatrième fois la longueur totale du tuyau, et aussi des durées relatives à un même parcours effectué par des ondes d'intensité initiale différente.

3° La vitesse est indépendante de l'acuité du son. Ainsi, des sons musicaux compris dans un intervalle de près de six octaves n'ont montré aucune différence quant à la durée de leur propagation sur un parcours dépassant 12^{km}. Les vibrations que l'ébranlement emporte avec lui ne semblent pas modifier sa vitesse.

4° La compression maximum décroît en progression géométrique quand la distance croît en progression arithmétique.

Ce fait établi, nous avons pu utiliser nos mesures à déterminer la vitesse limite pour une compression infiniment petite. Un premier calcul (dont le résultat ne peut pas éprouver de modification sensible) nous a donné $331^{\text{m}},3$, nombre à peine différent de celui qu'avaient trouvé autrefois les membres du Bureau des Longitudes.

Sur la propagation du son à l'intérieur d'un tuyau cylindrique. — Annales de Chimie et de Physique, 6ᵉ série, t. XIX; 1890.

Dans ce Mémoire nous avons étudié et discuté les expériences effectuées à Grenoble. Quelques faits nouveaux sont venus s'ajouter à ceux que nous avaient montrés immédiatement les graphiques et nous avons pu formuler les conclusions suivantes :

1° Quelle que soit la nature de l'ébranlement initial, l'onde sonore, par le fait même de sa propagation, tend vers une forme simple, déterminée.

2° Cette forme une fois atteinte, les différentes parties de l'onde se propagent avec une même vitesse uniforme, qui doit être regardée comme la vitesse normale de propagation du son.

3° L'ébranlement provoqué par un coup de pistolet présente d'abord une forme complexe, et les diverses parties se transportent avec des vitesses différentes; mais le sommet de l'onde prend promptement la vitesse normale, tandis que le front, parti avec une vitesse trop grande, ralentit progressivement son allure, en tendant vers cette même vitesse normale.

4° L'intensité du son du pistolet n'a aucune action sur la vitesse normale; mais l'excès de vitesse du front croît avec l'intensité.

5° Dans les limites entre lesquelles varie habituellement l'intensité des sons musicaux, elle ne modifie en rien leur vitesse de propagation, laquelle atteint très vite la valeur normale.

6° Les différences de hauteur des sons musicaux sont également sans influence sur leur vitesse de propagation.

7° Dans un tuyau de $0^{m},700$, le coup d'un pistolet chargé à 3^{gr} de poudre s'entend à plus de 13^{km}, le chant d'une flûte de 16^{pi} frappe encore l'oreille à 6^{km}; mais l'un et l'autre disparaissent comme son quand l'ébranlement initial s'est fondu en une onde unique, que les membranes suivent aisément au delà de 50^{km}.

8° La vitesse de propagation du son à l'air libre est plus grande que dans un tuyau, où l'influence des parois amène un retard en raison inverse du diamètre et dépassant $0^{m},46$ pour le son du pistolet transmis dans un tuyau de 1^{m} de diamètre.

9° La vitesse normale de propagation du son dans l'air libre, sec et à 0°, est par seconde $331^{m},10$, l'erreur probable étant inférieure à $0^{m},10$.

SUR DIFFÉRENTES QUESTIONS D'ENSEIGNEMENT.

Exposé des recherches entreprises sur la thermodiffusion. — Journal de Physique, t. IV, p. 97; 1875.

Sur la théorie dynamique des gaz. — Journal de Physique, t. VI, p. 73 et 175; 1877.

Sur une expérience de capillarité. — Journal de Physique, t. IV, p. 313; 1875.

Sur l'emploi du radiomètre comme appareil de démonstration. — Journal de Physique, t. VII, p. 19; 1878. — Société des Amis des Sciences; 1879.

Appareil pour montrer les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire. Comptes rendus, t. CIII, p. 1255; 1886. — Journal de Physique, 2e série, t. VI, p. 339; 1887.

Je me borne à citer ici un certain nombre de notes didactiques (celles qui se rapportent à la thermodiffusion et à la théorie cinétique des gaz), ou relatives à des expériences de cours.

Dans l'une de celles-ci, j'indique une expérience très simple pour constater l'excès de pression à l'intérieur d'une bulle de savon, conformément aux lois de la capillarité.

Dans une autre, je fais voir le parti que l'on peut tirer du radiomètre pour montrer à un auditoire nombreux, d'une façon aussi nette que commode, la distribution de la chaleur dans le spectre, l'absorption par l'eau et, en général, les phénomènes de chaleur rayonnante..

Dans une dernière note, je décris un appareil qui permet de suivre la propagation d'une onde sonore à l'intérieur d'un tuyau cylindrique, et de constater les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire, avec ou sans changement du signe de la vitesse.

BIBLIOGRAPHIE.

Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.

1. Sur l'équivalent mécanique de la chaleur, t. LXX, p. 1283; 1870.
2. Sur l'équivalent mécanique de la chaleur et sur les propriétés électrothermiques de l'aluminium, t. LXXI, p. 270; 1870.

3. Sur les courants d'induction produits dans les masses polaires de l'appareil de Foucault, t. LXXIV, p. 323 ; 1872.

4. Sur la température du Soleil, t. LXXVIII, p. 1425 ; 1874.

5. Sur la température du Soleil, t. LXXVIII, p. 1816 ; 1874.

6. Sur la température du Soleil, t. LXXIX, p. 746 ; 1874.

7. Mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 662 ; 1876.

8. Résultats des mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 729 ; 1876.

9. Conclusions des mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 876 ; 1876.

10. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du platine, t. LXXXV, p. 543 ; 1877.

11. Mesures actinométriques relevées en Algérie pendant l'été de 1877, t. LXXXVI, p. 818 ; 1878.

12. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du palladium, t. LXXXVII, p. 981 ; 1878.

13. Sur la radiation du platine incandescent, t. LXXXVIII, p. 171 ; 1879.

14. Chaleurs spécifiques et points de fusion de divers métaux réfractaires, t. LXXXIX, p. 702 ; 1879.

15. Intensités lumineuses des radiations émises par le platine incandescent, t. XCII, p. 866 ; 1881.

16. Sur la loi du rayonnement, t. XCII, p. 1204 ; 1881.

17. Sur la diffusion du carbone, t. XCIV, p. 28 ; 1882.

18. Température d'ébullition du zinc, t. XCIV, p. 720 ; 1882.

19. Sur un calorimètre par refroidissement, t. XCIV, p. 1510 ; 1882.

20. Observations sur la dernière Communication de M. C.-W. Siemens, t. XCVI, p. 253 ; 1883.

21. Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification, t. XCVI, p. 1033 ; 1883.

22. Sur l'étalon absolu de lumière, t. XCVIII, 1032 ; 1884.

23. Sur la propagation du son dans un tuyau cylindrique (en commun avec M. Vautier), t. CII, p. 103 ; 1886.

24. Appareil pour montrer les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire, t. CIII, p. 1255 ; 1886.

25. Polarisation par émission, t. CV, p. 111 ; 1887.

26. Comparaison des énergies rayonnées par le platine et l'argent fondants, t. CV, p. 163 ; 1887.

27. Sur la vitesse de propagation du son (en commun avec M. Vautier), t. CVI, p. 1003 ; 1888.

28. Sur l'électrolyse de l'eau (en commun avec M. Chassagny), t. CVIII, p. 284 ; 1889.

29. Sur l'alliage du kilogramme, t. CVIII, p. 895 ; 1889.

Annales de Chimie et de Physique.

30. Sur l'équivalent mécanique de la chaleur, 4e série, t. XXI, p. 64 ; 1870.

31. Mémoire sur la température moyenne de la surface du Soleil, 5e série, t. X, p. 289 ; 1877.

32. Mesure de la radiation solaire, 5e série, t. XVII, p. 391 ; 1879.

33. Sur l'étalon absolu de lumière, 6e série, p. 111 ; 1884.

Annales scientifiques de l'École Normale supérieure.

34. Sur la température du Soleil, 2e série, t. IV, p. 363 ; 1875.

Journal de Physique.

35. Exposé des recherches entreprises sur la thermodiffusion, t. IV, p. 97 ; 1875.

36. Sur une expérience de capillarité, t. IV, p. 313 ; 1875.

37. De la température du Soleil, t. V, p. 169 ; 1876.

38. Sur la théorie dynamique des gaz, t. VI, p. 73 et 175 ; 1877.

39. Sur l'emploi du radiomètre comme appareil de démonstration, t. VII, p. 19 ; 1878.

40. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du platine, t. VII, p. 69 ; 1878.

41. Chaleurs spécifiques et points de fusion de divers métaux réfractaires, t. IX, p. 81, 1880.

42. Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification, 2e série, t. II, p. 366 ; 1883.

43. Sur l'étalon absolu de lumière, 2e série, t. III, p. 241 ; 1884.

44. Appareil pour montrer les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire, 2e série, t. VI, p. 339 ; 1887.

3. Sur les courants d'induction produits dans les masses polaires de l'appareil de Foucault, t. LXXIV, p. 323; 1872.

4. Sur la température du Soleil, t. LXXVIII, p. 1425; 1874.

5. Sur la température du Soleil, t. LXXVIII, p. 1816; 1874.

6. Sur la température du Soleil, t. LXXIX, p. 746; 1874.

7. Mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 662; 1876.

8. Résultats des mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 729; 1876.

9. Conclusions des mesures actinométriques au sommet du mont Blanc, t. LXXXII, p. 876; 1876.

10. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du platine, t. LXXXV, p. 543; 1877.

11. Mesures actinométriques relevées en Algérie pendant l'été de 1877, t. LXXXVI, p. 818; 1878.

12. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du palladium, t. LXXXVII, p. 981; 1878.

13. Sur la radiation du platine incandescent, t. LXXXVIII, p. 171; 1879.

14. Chaleurs spécifiques et points de fusion de divers métaux réfractaires, t. LXXXIX, p. 702; 1879.

15. Intensités lumineuses des radiations émises par le platine incandescent, t. XCII, p. 866; 1881.

16. Sur la loi du rayonnement, t. XCII, p. 1204; 1881.

17. Sur la diffusion du carbone, t. XCIV, p. 28; 1882.

18. Température d'ébullition du zinc, t. XCIV, p. 720; 1882.

19. Sur un calorimètre par refroidissement, t. XCIV, p. 1510; 1882.

20. Observations sur la dernière Communication de M. C.-W. Siemens, t. XCVI, p. 253; 1883.

21. Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification, t. XCVI, p. 1033; 1883.

22. Sur l'étalon absolu de lumière, t. XCVIII, 1032; 1884.

23. Sur la propagation du son dans un tuyau cylindrique (en commun avec M. Vautier), t. CII, p. 103; 1886.

24. Appareil pour montrer les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire, t. CIII, p. 1255; 1886.

25. Polarisation par émission, t. CV, p. 111; 1887.

26. Comparaison des énergies rayonnées par le platine et l'argent fondants, t. CV, p. 163 ; 1887.

27. Sur la vitesse de propagation du son (en commun avec M. Vautier), t. CVI, p. 1003; 1888.

28. Sur l'électrolyse de l'eau (en commun avec M. Chassagny), t. CVIII, p. 284 ; 1889.

29. Sur l'alliage du kilogramme, t. CVIII, p. 895; 1889.

Annales de Chimie et de Physique.

30. Sur l'équivalent mécanique de la chaleur, 4e série. t. XXI, p. 64; 1870.

31. Mémoire sur la température moyenne de la surface du Soleil, 5e série, t. X, p. 289; 1877.

32. Mesure de la radiation solaire, 5e série, t. XVII, p. 391; 1879.

33. Sur l'étalon absolu de lumière, 6e série, p. 111; 1884.

Annales scientifiques de l'École Normale supérieure.

34. Sur la température du Soleil, 2e série, t. IV, p. 363 ; 1875.

Journal de Physique.

35. Exposé des recherches entreprises sur la thermodiffusion, t. IV, p. 97 ; 1875.

36. Sur une expérience de capillarité, t. IV, p. 313 ; 1875.

37. De la température du Soleil, t. V, p. 169 ; 1876.

38. Sur la théorie dynamique des gaz, t. VI, p. 73 et 175 ; 1877.

39. Sur l'emploi du radiomètre comme appareil de démonstration, t. VII, p. 19 ; 1878.

40. Chaleur spécifique et chaleur de fusion du platine, t. VII, p. 69 ; 1878.

41. Chaleurs spécifiques et points de fusion de divers métaux réfractaires, t. IX, p. 81, 1880.

42. Sur la radiation de l'argent au moment de sa solidification, 2e série, t. II, p. 366 ; 1883.

43. Sur l'étalon absolu de lumière, 2e série, t. III, p. 241; 1884.

44. Appareil pour montrer les deux modes de réflexion d'un mouvement vibratoire, 2e série, t. VI, p. 339 ; 1887.

45. Comparaison des énergies totales émises par le platine et l'argent fondants, 2e série, t. VII, p. 193 ; 1888.

46. Polarisation par émission, 2e série, t. VII, p. 193 ; 1888.

Revues.

47. Une expédition au mont Blanc, *Revue des Deux-Mondes ;* novembre 1875.

48. Voyage scientifique en Algérie, *Club alpin ;* 1877.

49. La chaleur solaire, *Revue des cours scientifiques ;* 2e série, t. XIV, p. 944 ; 1er semestre 1878.

50. Sur le radiomètre, *Société des Amis des Sciences ;* 1879.

51. Actinométrie, *Revue scientifique ;* 2e série, t. XVIII, p. 1077 ; 1er semestre 1880.

Publications.

52. Théorie mécanique de la chaleur de Verdet. 2 volumes publiés en collaboration avec Prudhon. Paris, Masson ; 1872.

53. Rapport au Congrès météorologique de Rome sur la question XIX : mesure de la radiation solaire ; rôle de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Utrecht, Keminck et fils ; 1879 ; et, par réimpression, Paris, Gauthier-Villars ; 1879.

54. Rapport, au nom de la classe 8, sur la lumière électrique à l'Exposition internationale d'électricité. Paris, Masson ; 1881.

55. Éclairage électrique, dans l'*Encyclopédie chimique*, publiée sous la direction de M. Fremy. Paris, Dunod ; 1883.

56. Expériences faites en vue de déterminer l'unité absolue de lumière. Paris, Gauthier-Villars ; 1884.

57. Cours de physique. Paris, Masson (en cours de publication).

15198 Paris. — Impr. Gauthier-Villars et Fils, quai des Grands-Augustins, 55.